

## **CHAPITRE III**

### **FROTTEMENT DES SURFACES DE CONTACT**

#### **III.1. Définition**

Le frottement peut être défini comme la force qui agit entre deux corps à leur surface de contact, de façon à freiner le déplacement de l'une par rapport à l'autre.

#### **III.2. Causes du frottement**

Un frottement intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement.

Ses effets dans la vie quotidienne : se frotter les mains pour se réchauffer, craquer une allumette, jouer du violon, glisser sur la glace, freiner en voiture, entendre un crissement de craie sur le tableau, mettre de l'huile dans les gonds de porte, etc.

Le frottement de glissement est le frottement qui se produit lorsqu'on déplace, sans la faire rouler, la surface d'un corps solide sur la surface d'un autre corps solide. C'est le type de frottement le plus fréquent : un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier et un traîneau glissant sur le sol produisent un frottement de glissement.

#### **III.3. Théorie de l'adhésion**

En physique, l'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produisent lorsque l'on met en contact intime deux matériaux, dans le but de créer une

résistance mécanique à la séparation. Une fois le contact établi, l'énergie nécessaire pour réaliser la séparation s'appelle énergie d'adhésion. Elle ne doit pas être confondue avec l'adhérence, qui est au contraire la force nécessaire.

L'adhésion directe entre matériaux est rare. Elle a lieu uniquement pour des matériaux très lisses et extrêmement propres (silicium par exemple), que l'on parvient à mettre en contact intime, c'est-à-dire à des distances de l'ordre de la taille atomique (nanomètre). Elle est donc souvent impossible si les surfaces sont rugueuses.

### III.4. Théories sur la friction

#### III.4.1. Force et coefficient de frottement

Une pièce (2) est appliquée contre une pièce plane (1) par une force  $N$  normale au point de contact (figure III.1). L'expérience montre qu'on peut appliquer à la pièce (2) une force  $T$  parallèle à la surface de contact sans qu'elle se mette en mouvement. Il existe donc une force  $F^-$  appliquée par le corps (1) à la pièce (2) capable de s'opposer à  $T$  et d'empêcher le mouvement.

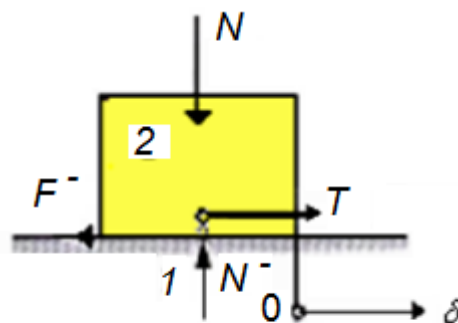


Figure III.1: Force de frottement.

En observant le déplacement  $\delta$  du solide (2) à partir de sa position où  $T=0$ , on observe d'abord un très petit mouvement qu'on appelle micro glissement lorsque  $T$  croît (figure III.2). Pour une certaine valeur  $T_0 = F_0$ , la pièce se met en mouvement, en supprimant la force tangentielle  $T$ , la pièce ralentit, puis s'arrête.

Par définition, le coefficient de frottement  $\mu$  est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale qui les applique l'une sur l'autre.

$$\mu = \frac{F}{N}$$

Où  $F = T$  est la force nécessaire à un glissement permanent et  $N$  la charge s'exerçant sur le solide (2) lors du déplacement. La formule  $\mu = \frac{F}{N}$  est la loi d'AMONTONS.

### **III.5. Modèles de frottement**

#### **III.5.1. Frottement de glissement**

Le frottement de glissement est le frottement qui se produit lorsqu'on déplace, sans la faire rouler, la surface d'un corps solide sur la surface d'un autre corps solide. C'est le type de frottement le plus fréquent : un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier, un trainard de tour se déplace sur une glissière et un traîneau glissant sur le sol produisent un frottement de glissement.

On distingue plusieurs phénomènes susceptibles lors de glissement tels que :

##### **III.5.1.1. Adhérence**

L'adhérence est liée aux interactions entre les atomes des surfaces en contact. Pour les métaux se fait par la présence d'électrons libres à leur surface qui forment des filiations cristallines (jonctions cohésives) ou qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques (fonctions adhésives).

L'adhérence est favorisée par le contact qui existe entre les métaux lorsque les aspérités sont écrasées plastiquement. En séparant un métal dur pressé contre un métal mou, on constate que des particules de ce dernier sont arrachées et adhèrent à la surface du premier. Donc il y a transfert du métal mou sur le métal dur. On observe que l'adhérence est réduite avec l'augmentation de la dureté ou de la rugosité des corps en contact.

On calcule la valeur de la force nécessaire pour provoquer le glissement des aspérités pressées contre une surface. Les aspérités sont en état de déformation plastique.

La condition de glissement plastique s'écrit :

$$P_r^2 + C\tau_f^2 = C\tau_e^2$$

C: Constante est comprise entre 12 et 27.

L'équation précédente fournit :  $P_r = \sqrt{C(\tau_e^2 - \tau_f^2)}$

Soit la surface de contact  $A_r$  en présence d'une force tangentielle, on a la charge normale transmise par l'aspérité :

$$N = P_r A_r$$

La force de cisaillement du film

$$T = \tau_f . A_r$$

La force normale peut être liée à la résistance à la pénétration :

$$N = H A_r$$

H: La dureté du matériau le plus mou.

Le coefficient de frottement

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{\tau_f . A_r}{A_r . H} = \frac{\tau_f}{H}$$

Selon la relation  $T = \tau_f A_r$ , si on veut avoir une force de frottement minimale, il est nécessaire de réduire l'aire de contact réelle et la contrainte de cisaillement (figure III.2a).

Pour minimiser l'aire de contact, on utilise les métaux durs, comme les aciers trempés (figure III.2b).

Pour réduire le cisaillement, on recouvre le contact d'un film mince réalisé avec un métal tendre comme le plomb ou l'argent (figure III.2c).

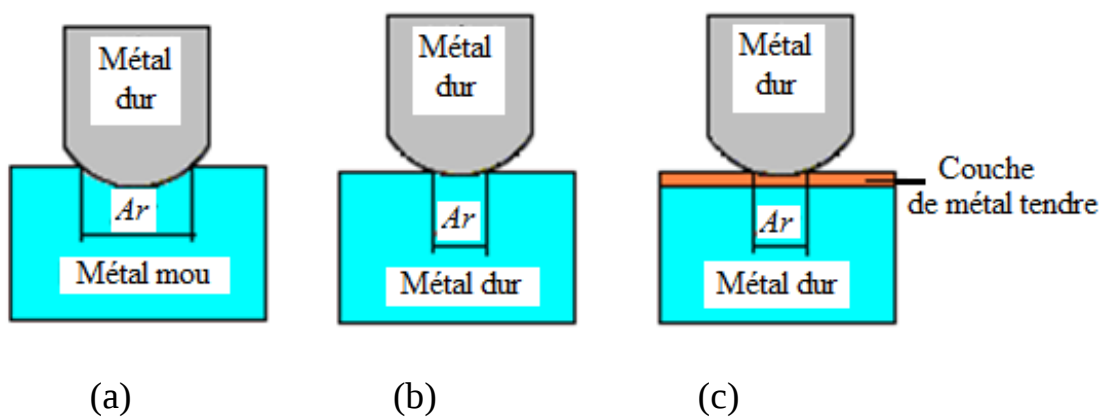


Figure III.2: Optimisation du frottement.

### III.5.1.2. Labourage

Une aspérité dure chargée par une force normale  $N$  s'enfonce dans une surface tendre (figure III.3). L'application d'une force tangentielle repousse la matière tendre de sorte que l'aspérité ne porte que sur le flan opposé à la force. Au début du glissement, la matière de la base est repoussée et forme devant l'aspérité le bourrelet frontal, l'aspérité remonte au-dessus de sa position initiale.

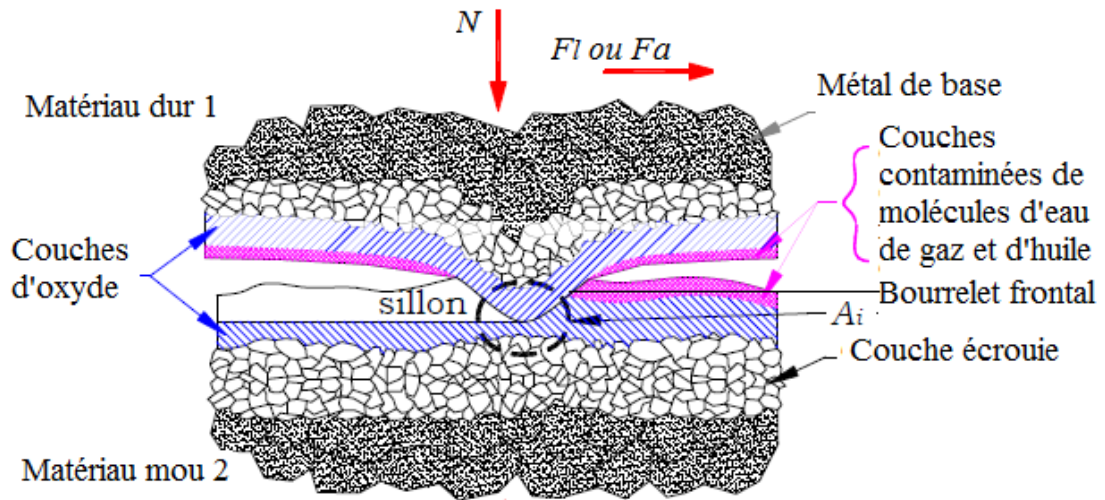


Figure III.3: Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure.

Bowden et Tabor supposent que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux:

Le cisaillement des microjonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec  $F_{fr}$  est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion  $F_a$  et d'une force de déformation due au labourage  $F_l$ .

$$F_{fr} = F_a + F_l$$

### III.5.2.1. Frottement par roulement

La force de frottement par roulement se manifeste lorsque deux corps roulent, sans glisser, l'un sur l'autre ; la dissipation étant en ce cas due à l'élasticité imparfaite des matériaux. Supposons une roue de rayon  $r$  soumise à une charge  $N$  roulant sans glisser sur un plan (figure III.4) : il est possible d'observer que le matériau dont elle est constituée subit, à l'approche du point de contact, une compression et, une fois le point de contact dépassé, un relâchement élastique.

Si le matériau dont la roue est constituée n'est pas parfaitement élastique, une part de l'énergie dépensée en compression n'est pas restituée lors de la phase suivante (phase de restitution) mais se dissipe sous la forme de chaleur pour compenser les résistances de frottement interne du matériau.

Si l'on raisonne en termes de forces, et non plus en termes d'énergies, on peut dire que la distribution de pression dans le contact n'est pas symétrique à la direction de la force N.

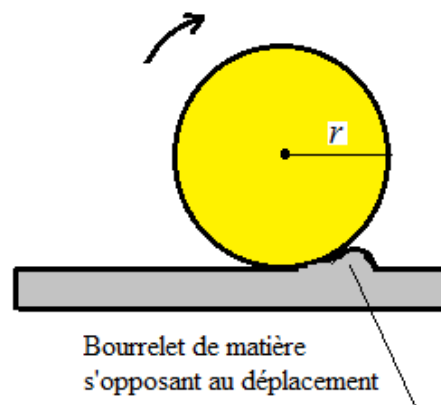


Figure III.4 : Frottement par roulement.

L'aire de contact est montrée sur la figure III.5, un micro glissement se fait au niveau de cette surface.

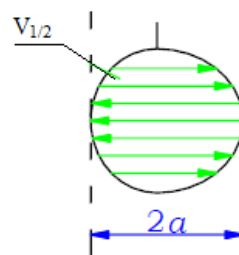


Figure III.5 : Aire de contact.

Le Frottement de roulement est déterminé par :  $F_r = f_g \cdot a \cdot P / r$

$f_r = f_g \cdot a / r$  : facteur de frottement de roulement.

### III.5.3.2. Réduction du frottement de roulement

En roulement, il y a toujours du frottement de glissement (microglissement) qui résulte de l'adhérence, sinon, il n'y a pas de roulement.

- Utiliser des éléments roulants de grand rayon.
- Utiliser des matériaux avec un grand module de rigidité (module de Young).

#### III.5.4. Frottement avec lubrification

La présence d'un film de lubrifiant réduit considérablement le coefficient de frottement, dont la valeur se situe alors typiquement entre 0,2 et 0,1. Il existe trois régimes de lubrification :

- Limite ou onctueuse.
- Hydrodynamique.
- Mixte.

##### III.5.4.1. Régime de lubrification limite, ou onctueuse

- Un film ou une couche très fine de lubrifiant recouvre les surfaces en contact (figure III.6).

Le frottement diminue ( $\mu \approx 0.03$  à  $0.2$ ) et le glissement est favorisé. Il y a moins d'arrachement, de débris d'usure. Ce régime est favorisé par des faibles vitesses, des faibles viscosités de l'huile et des fortes pressions de contact.

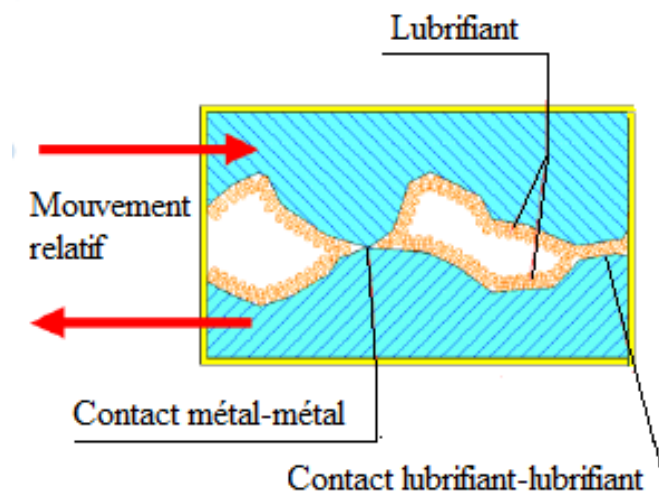


Figure III.6 : Lubrification limite.

#### III.5.4.2. Régime de lubrification hydrodynamique

L'épaisseur moyenne du film liquide  $h$  dépasse largement la rugosité moyenne  $R_a$  des surfaces de contact ( $h/R_a > 1$ ). Il n'y a presque aucun contact entre les surfaces (figure III.7). Celles-ci sont toujours séparées par une Couche de lubrifiant d'épaisseur minimale ( $h = 0.02$  à  $0.008$  mm). Ce régime s'établit lorsque la force normale est relativement faible et que la viscosité du lubrifiant est élevée. Le frottement est très réduit ( $\mu \approx 0.008$  à  $0.02$ ), donc, les contacts lubrifiés travaillent normalement dans ce régime parce que l'usure y est plus faible.

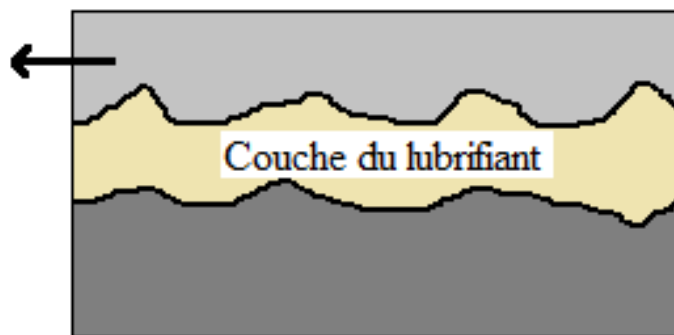


Figure III.7 : Lubrification hydrodynamique

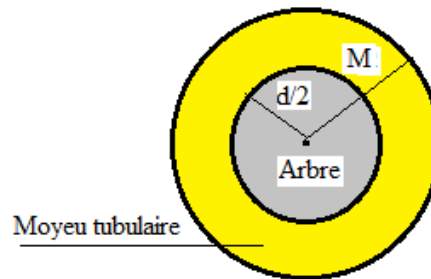
#### III.5.4.3. Régime de lubrification mixte

C'est un mélange de frottement onctueux et de frottement hydrodynamique, caractérisé par une portance hydrodynamique discontinue avec quelques contacts locaux. Le frottement ( $\mu \approx 0.04$  à  $0.1$ ) et l'usure sont encore réduits.

#### Application

Un arbre en acier ( $E = 200$  GPa) de diamètre  $d = 100$  mm doit transmettre à un moyeu une puissance  $P = 100$  kW à une vitesse  $n = 1200$  tr/min, soumis à une force axiale

$F_a = 5\text{kN}$ . La longueur du moyeu est  $L = 2d$ , le rayon extérieur du moyeu est  $M = d$  et le coefficient de frottement sec entre l'arbre et le moyeu est  $\mu = 0,14$ . On note  $r = d / 2$  le rayon de l'arbre.



Calculer les grandeurs suivantes :

- Le couple  $C$  à transmettre
- La force tangentielle  $F_t$
- La force de frottement totale  $F_f$
- La pression minimale d'interférence  $p$  nécessaire entre l'arbre et le moyeu pour transmettre la puissance avec un facteur de sécurité  $s = 2$

### Solution

- Le couple  $C$  à transmettre :  $P = C \omega$

$$C = P / \omega \quad \omega = 2\pi n / 60 \text{ rd/s}$$

$$C = 100000 * 60 / 2\pi * 1200 = 796,17 \text{ Nm}$$

La force tangentielle  $F_t$

$$F_t = C / r \quad r = d / 2$$

$$F_t = 796,17 / 50 * 10^{-3} = 15,9 \text{ kN}$$

- La force de frottement totale  $F_f$

$$F_f = ((F_t)^2 + (F_a)^2)^{1/2}$$

$$F_f = ((15,9)^2 + (5)^2)^{1/2} = 16,66 \text{ kN}$$

- La pression minimale d'interférence  $p$  nécessaire entre l'arbre et le moyeu pour transmettre la puissance avec un facteur de sécurité  $s = 2$

$$p = F_f \cdot s / 2\pi r L \mu \quad p = 16,66 \cdot 10^3 \cdot 2 / 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14$$

$$p = 3,78 \text{ MPa}$$

### III.6. Quantité de chaleur

Considérons un frottement en mouvement sur une surface plane. La quantité de chaleur générée par le frottement, par unité de surface et de temps ou la densité de flux dissipée s'exprime sous la forme :

$$\Phi = \mu N V$$

La quantité de chaleur générée par le frottement :

$$q = \frac{\mu N V}{A_a} \quad \left[ \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right]$$

Avec  $\mu$  le coefficient de frottement,  $N$  est la charge normale appliquée sur le frotteur,  $V$  est la vitesse de glissement et  $A_a$  est l'aire apparente du contact.

L'équation peut aussi s'écrire comme suit :

$$q = \mu P V = \tau V$$

$P$  est la pression moyenne dans le contact.

### III.7. Energie de frottement cumulée

Diverses méthodes de calcul de l'énergie dissipée dans différents contacts tribologiques sont proposées dans la littérature. Les influences de divers paramètres des essais de frottement,

par exemple mode de glissement, charge normale et combinaison de matériaux ont été examinées. En fait, l'augmentation de la température locale résulte d'une dissipation de l'énergie de frottement dans la zone de contact. Mohbacher a introduit le concept d'énergie dissipée cumulée  $E_d$ . L'énergie dissipée  $E_d$  étant proportionnelle à la force tangentielle, à la distance du déplacement:

$$E_d = \sum T.d$$

### III.8. Puissance moyenne de frottement $P_f$

Sera mesurée par le rapport entre l'énergie de frottement  $E_d$  et la durée  $t$  de l'essai :

$$P_f = \frac{E_d}{t}$$

La figure III.8 donne la proportion des différentes formes sous lesquelles d'énergie dissipée est transformée. Elle permet de mettre en évidence la diversité des réactions ayant lieu au cours du frottement. Plus de 90% de l'énergie mise en jeu est dissipée sous forme de chaleur.

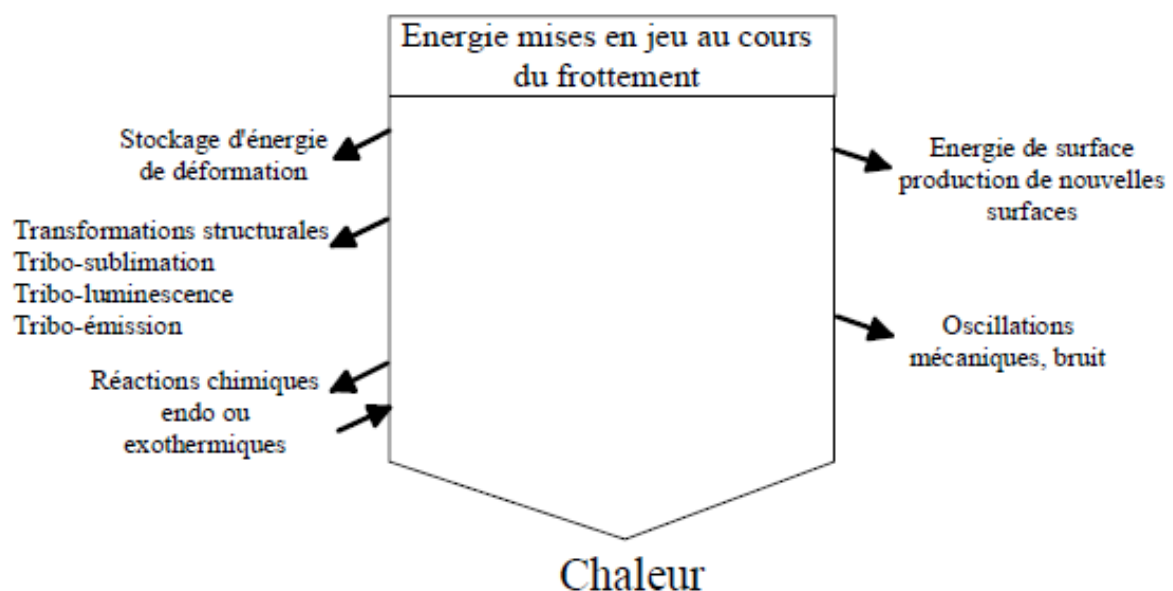


Figure III.8 : Différentes formes d'énergie mises en jeu au cours du frottement.

### III.9. Modèle thermique d'Archard

Considérons la surface de contact entre le pion et le disque, circulaire de rayon  $a$  (figure III.9). La chaleur dissipée dans le contact peut être assimilée à celle provenant de deux sources : une source fixe transmettant une quantité de chaleur par unité de temps  $Q_d$  du disque mobile et une source mobile transmettant une quantité de chaleur par unité de temps  $Q_p$  du pion fixe. La chaleur générée  $Q = Q_d + Q_p$  est distribuée entre les deux surfaces de telle sorte que l'élévation de température à l'interface soit la même pour les deux solides, Ce qui permet de calculer les flux thermiques à travers chaque composant du couple, qui dépendent surtout des paramètres mécaniques tels que la vitesse  $V$ , la géométrie du contact, la capacité calorifique et du nombre de Peclet  $L$ .

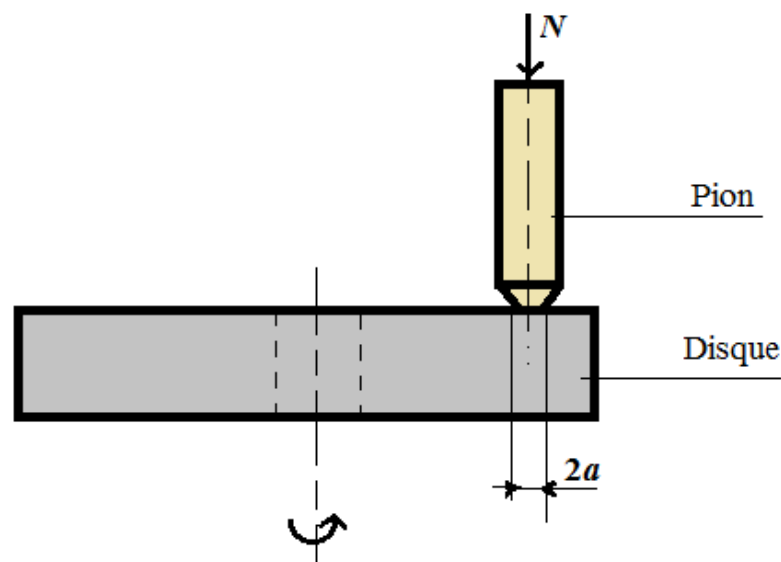


Figure III.9 : Contact entre le pion et le disque.

On s'accorde à considérer deux régimes, l'un dit établi dans lequel la vitesse de glissement soit faible et un autre régime aux grandes vitesses. La limite de la vitesse du régime établi se détermine à partir des valeurs de  $L$  défini par la relation :

$$L = \frac{V \cdot a}{2\chi}$$

$a$  : Le rayon de la surface réelle totale de contact,

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

$V$  est la vitesse de glissement.  $\chi$  est la diffusivité thermique.

$\lambda$  est la conductibilité thermique,  $\rho$  : Densité, et  $C_p$  la chaleur spécifique.

$L$  Représente le rapport entre le temps nécessaire pour atteindre la température maximale à une profondeur égale à  $a$ , dans le cas d'un pulse thermique appliqué à la surface et la durée du pulse.

Si  $L < 0,1$ , le régime est établi et la température du pion à l'interface s'écrit comme suit :

$$\Delta\theta_m = \frac{Q_p}{4a.\lambda_p}$$

Avec

$$Q_p = Q_d = \mu.N.V$$

$\mu$  : Coefficient de frottement et  $N$  la charge normale appliquée et  $\lambda_p$  étant la conductibilité

thermique du pion.  $\Delta\theta_m = \frac{Q_d}{4a.\lambda_d}$

De même, la relation conduisant la température à l'interface pion-disque, côté disque s'écrit :

Dans le cas ou  $L > 5$ , la température à l'interface est :

$$\Delta\theta_m = \frac{0,31.Q_p}{\lambda_p.a} \left( \frac{\chi_p}{V.a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Si  $0,1 < L < 5$  on prend la relation :

$$\Delta\theta_m = \alpha \frac{Q_p}{4a.\lambda_p}$$

Avec  $\alpha$  variant de 0,85 à 0,35, lorsque  $L$  varie de 0,1 à 5.

Evaluation de la surface réelle de contact  $A_r$

$$A_r = \pi.a^2.$$

### **III.10. Choix des Matériaux**

Le choix d'un matériau de frottement est un problème d'optimisation entre des qualités souvent contradictoires.

- Propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement et amortissement des vibrations et des chocs.
- Propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion et aptitude aux traitements.
- Facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et aux propriétés anti-usure grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion, à la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.
- Propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, auto- réparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident ;
- Comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support ;
- Propriétés « socio-économiques » : coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, dépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques.

Pour minimiser le frottement de glissement il faut :

- Favoriser la formation de films de surface à faible cisaillement tels que les films d'oxyde ou des films de matières organiques adsorbés ou à base de matériaux de faible résistance (réduire le frottement dû à l'adhérence).
- Minimiser le labourage par le choix des surfaces dures afin de réduire la pénétration des aspérités (traitement de surfaces ou placages durs).
- Les surfaces très lisses augmentent l'aire de contact et par conséquent, l'adhérence de des surfaces, par contre, les surfaces très rugueuses favorisent l'enchâssement ; il existe donc une rugosité optimale.